

整理番号 2018M-186

補助事業名 平成30年度数値シミュレーションと実測を融合した避雷器のギャップ  
構造設計手法の開発補助事業

補助事業者名 国立大学法人宮崎大学 工学部 准教授 武居 周

## 1 補助事業の概要

本申請課題では、スーパーコンピュータを用いた大規模解析手法を適用することによって、避雷器内部の放電路を直接的かつ詳細に評価できる手法を開発します。本手法により高精度かつ高効率な避雷器設計が実現でき、かつ計算科学分野の発展へ寄与し、かつ電気機器設計技術の向上に役立てます。スーパーコンピュータなどの並列計算機に適した並列時間領域有限差分法コードと、それに連成させる電荷の移動計算を行う粒子法計算コードを研究開発します。

## 2 研究の目的と背景

避雷器は、送電系に落雷があった際に生じる雷サージを地中に逃がすために送電線と大地の間に設置される保護装置です。装置内部にギャップ電極があり、電極の形状やギャップ間に挿入されるスペーサと呼ばれる誘電体の材質により放電が制御されます。避雷器は、雷サージのみを確実に大地に放電し、それに続く電源電流は遮断し保護する挙動が要求されます。したがって、避雷器の設計時に放電電圧波形から高精度に放電路を予測し、雷サージのみを放電し電源電流を流さない特性となる電極形状とスペーサの誘電率の選定が重要となり、この評価を可能とする数値解析手法の研究開発が求められています。

そこで本研究では、実際の避雷器の設計図に基づき構築した高精度数値データと、実測により得られる放電時の電極電圧波形を境界条件・初期条件として直接用いることが可能な、並列時間領域有限差分法とそれに連成する粒子法コードを開発します。

従来の静電界解析手法に基づく放電路予測には、商用コードが用いられてきましたが、適用可能な規模が数十万要素程度の小規模な2次元問題にとどまります。このため、既存の研究において、ギャップ電極間の電流密度解析は、スペーサの非対称性を無視する等の単純化した形状モデルにより電極に一様な電位を与え計算するといった手法が主でした。このような技術的問題の顕在化に対して、本研究では、非定常電流密度解析手法を研究開発することにより、従来の静電界解析による簡易的な放電路予測ではなく、実測により得られた放電時の電極電圧波形より境

界条件・初期条件を得て時間発展する3次元の放電シミュレーションが可能なシミュレーションコードを開発します。本研究では、スパコンを利用する、避雷器実機に基づく高精度シミュレーションと実測の融合により、電極間の放電路の予測に基づく電極形状とスペーサ素材の最適化を実現し、避雷器の性能向上に寄与します。

### 3 研究内容

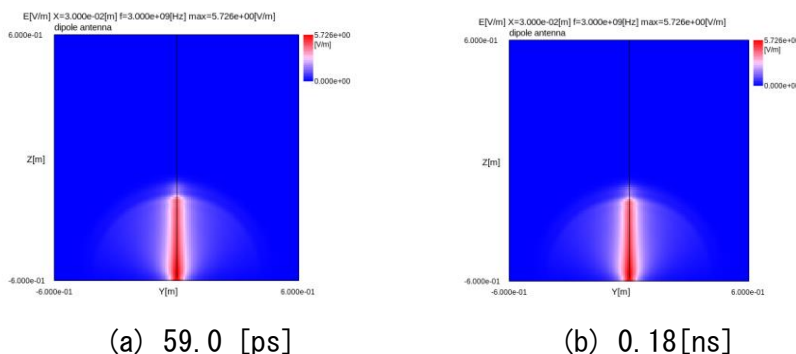
#### (1) 事業の目的

本事業の目的は、スパコンを利用する、避雷器実機に基づく高精度シミュレーションと実測の融合により、電極間の放電路の予測に基づく電極形状とスペーサ素材の最適化を実現することです。具体的には、a) 実機に基づく数値モデルおよび電極電圧波形実測データを用いる大規模非定常電磁界解析の実現のためのコード開発、b) 実測した電極電圧波形の取得、c) 電荷の移動を計算する並列粒子法コードの実現、の3つの研究開発を軸として推進します。

#### (2) 実施内容

##### a) 並列非定常電流解析システムの構築

本研究ではまず、放電路予測の計算に用いる並列非定常電流解析システムを開発しました。非定常電流解析システムを、時間領域有限差分法により構築しました。並列計算は OpenMP によるノード内並列と MPI によるノード間並列の両方に対応させました。図 1 に放電発生により時間発展する電界の非定常計算結果の可視化した例を示します。ここでの計算は、ごく簡単な放電が発生する寸法 1, 200 [mm] x 1, 200 [mm] x 1, 200 [mm] の自由空間モデルを用いています。Grid 数は 1,728,000 です。



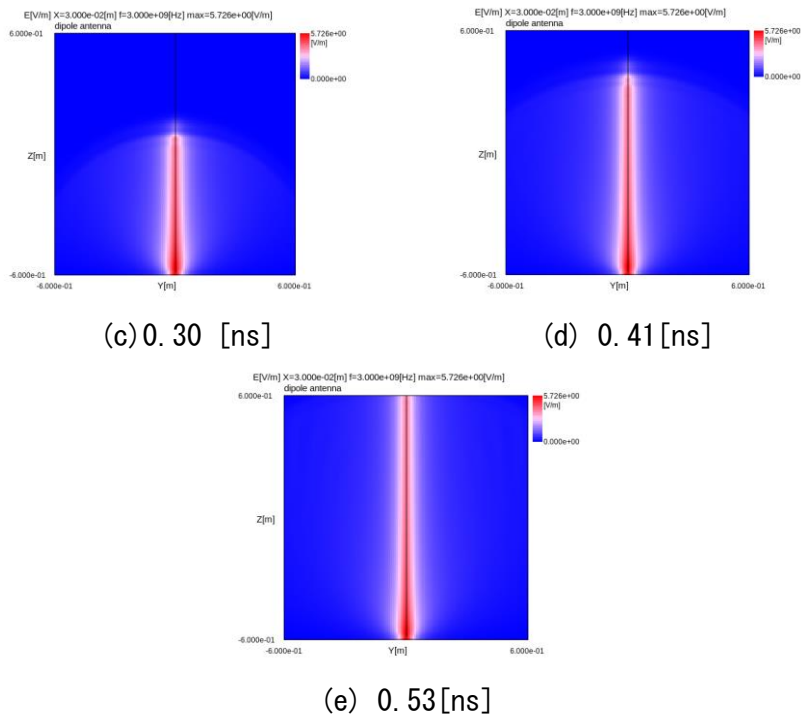


図1 放電発生により時間発展する電界の非定常計算結果  
(各時刻は放電発生からの経過時間)

本システムにより放電時に発生する電界の計算が可能であることが示されました。並列環境における性能評価を行った結果を図2に示す。並列化効率は2並列計算時が99.6%, 4並列時が96.6%, 8並列時が90.0%, 16並列時が83.2%, 32並列時が67.8%であり、特に32並列以上の高並列実行時に改善の余地はあるが、高い並列計算の効果が見られることがわかります。

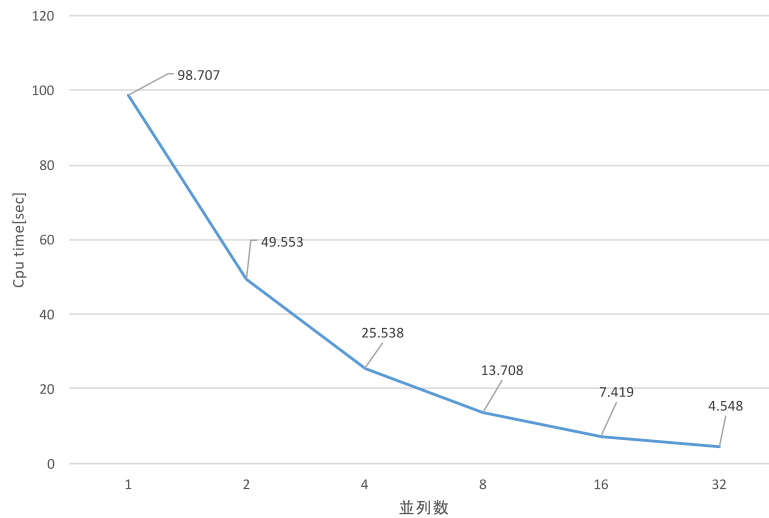
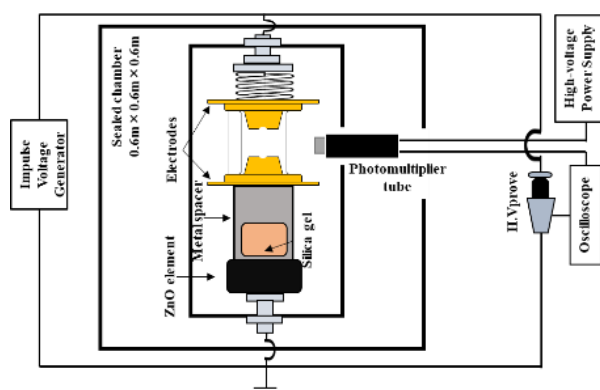


図2 並列計算の効果

b) 実験環境の構築ならびに避雷器の放電（インパルスコロナ）実測

本実験の目的は、雷インパルス電圧における火花放電前のコロナ放電の有無の確認であり、本実験において得られたコロナ放電電圧・電流波形を数値シミュレーションの入力として用います。測定項目は光電子増倍管によりコロナ放電の放電光を測定します。実験条件は、電極D、観測のために1/4カットしたスペーサ、火花放電が発生しない最大電圧18kV及び半減値の9kV, 4.5kV, 2.25kVの標準雷インパルス電圧を印加しました。測定箇所からの距離は30cmです。ノイズ測定として光電子増倍管を暗幕で覆いました。

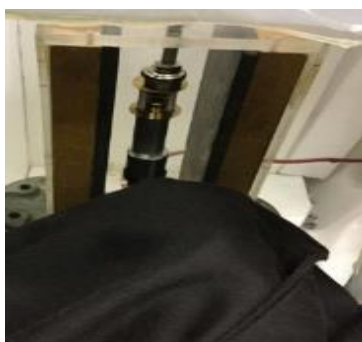
実験回路を図3(a)に示します。放電ギャップ部を光電子増倍管で測定しました。外観を図3(b), (c)に示します。



(a) 実験回路図



(b) 装置外観（暗幕装着なし）

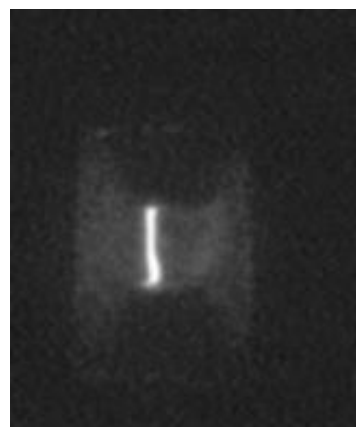


(c) 装置外観（暗幕装着あり）

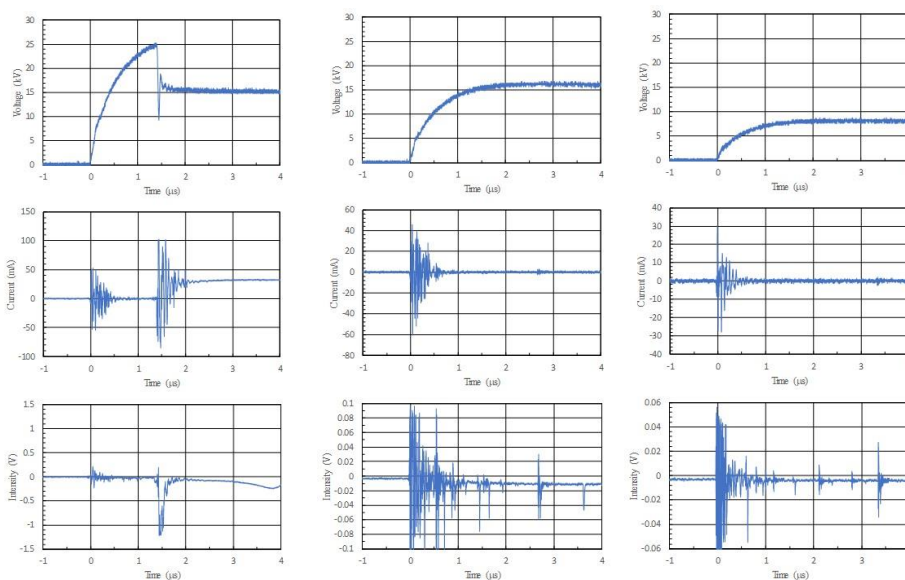
図3 避雷器内部の放電実験系



(a) 放電発生前の様子



(b) 放電発生時の様子



(c) 充電電圧30 kV

(d) 充電電圧18 kV

(e) 充電電圧9 kV

図4 避雷器内部の放電時の波形観測結果

各充電電圧値における放電時のコロナ波形を図4(c), (d), (e)において電圧(上), 電流(中), 放電光パターン(下)を示します。これらの結果より、放電時の電圧・電流・発光パターンの観測に成功し、ここで得られた電圧波形および電流波形を数値シミュレーションの入力として与え、解析を実行することで放電発生時の電界を計算します。その電界の分布および放電開始位置などを用いて、放電経路を予測するフレームワークを構築しました。

### c) 粒子法計算コードの開発

粒子法コードにより、放電時に発生するプラズマ内の粒子(電子, イオン, 中性原子)の移動を計算します。ここでは、ニュートン・ローレンツの運動方程式に基づく微分方程式をルンゲクッタ法により解くことで粒子速度を決定し、粒子位置を更新する方法としました。粒子法ソルバの動作検証として、図5に示す単一粒子に  $x$  軸方向に一定の磁束密度と  $z$  軸方向に初期モーメントを与えた時の粒子軌道の計算を行います。解析結果を図6に示します。ローレンツ力に従って  $x$  軸に垂直な面をローモーションしている様子が確認できます。

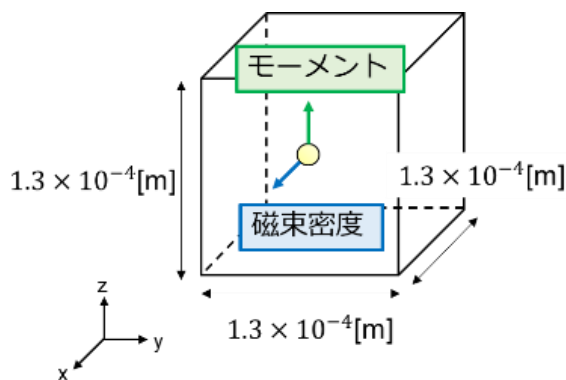


図5 解析モデル

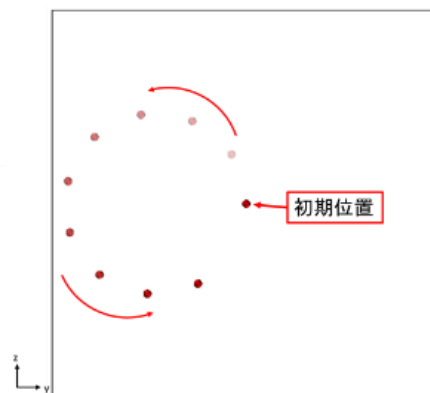


図6 解析結果

## 2 予想される事業実施効果

年間落雷日数が全国平均の19.4日を大きく上回る九州地方において、電力網への落雷時に雷サージを大地に放電させる避雷器の特性改善は、雷多発時でも安定した電力供給を実現するために特に重要となります。雷サージの確実な放電が可能な避雷器の設計には、数値解析による落雷時の電極間の放電路予測に基づき避雷器内部のギャップ構造を決定する設計技術の確立が望まれています。本事業で実現した高精度解析手法の検

討を今後継続して実施することによって、雷サージの確実な放電が可能な避雷器の設計精度向上に大きく寄与すると予想されます。

本事業を通してシミュレーションは、避雷器設計において設計精度を向上させるために有効な手法である見通しが立ちました。本事業において研究・開発しましたシミュレーション・システムは、避雷器設計の高精度・高確度化に寄与します。また、本システムにおける電磁界解析機能は、例えば核融合炉内のプラズマ計算等にも応用可能であり、プラズマを用いる機器設計において広く波及する可能性があります。

### 3 補助事業に係る成果物

#### (1) 補助事業により作成したもの

本事業で作成したものは、放電シミュレータを構成する、1. 並列FDTD法コード、2. 粒子法コードとなります。これらのコードを今後、理化学研究所「富岳」、名古屋大学「不老」等のスーパーコンピュータ環境においてパフォーマンスが得られるよう、継続して研究開発を推進します。

#### (2) (1)以外で当事業において作成したもの

並列高周波電磁界解析コードADVENTURE\_FullWave を、オープンソース・ソフトウェアとして東京大学ADVENTURE Project (<https://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/>) からリリースしました (Ver. 0.11b. 2019年12月25日)。

また、関連して、並列高周波電磁界解析コードの技術移転により完成しました並列音響解析コードADVENTURE\_Sound を、オープンソース・ソフトウェアとして東京大学ADVENTURE Projectからリリースしました (Ver. 0.2b. 2019年10月10日)。

#### 4 事業内容についての問い合わせ先

団体名： 国立大学法人宮崎大学 工学部電気システム工学科 電磁情報研究室  
(コクリツダイガクホウジンミヤザキダイガク コウガクブデンキシステムコウガッカ)

住所： 〒889-2192

宮崎県宮崎市学園木花台西1-1

代表者： 准教授 武居周 (タケイアマネ)

担当部署： 宮崎大学工学部 (ミヤザキダイガクコウガクブ)

担当者名： 准教授 武居周 (タケイアマネ)

電話番号： 0985-58-7403

F A X: 0985-58-7403

E-mail: [takei@cc.miyazaki-u.ac.jp](mailto:takei@cc.miyazaki-u.ac.jp)

U R L: <http://hamayu.emi.miyazaki-u.ac.jp/>(研究室トップページ)

<http://www.save.sys.t.u-tokyo.ac.jp/~takei/index-j.html>

(バナー貼付個人ホームページ)

※広報資料へは以下のようにアクセスして下さい。

<http://hamayu.emi.miyazaki-u.ac.jp/>(研究室トップページ)

↓(メンバー → 武居周(Amane Takei))

<http://www.save.sys.t.u-tokyo.ac.jp/~takei/index-j.html>

↓(研究助成 → 当該助成箇所の(広報資料はこちら))

[http://www.save.sys.t.u-tokyo.ac.jp/~takei/H30\\_Kouhou.pdf](http://www.save.sys.t.u-tokyo.ac.jp/~takei/H30_Kouhou.pdf)